Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 16, No. 1, Apr. May. 2020, p.29-42

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد 16، شماره 1، فروردین-اردیبهشت 1399، ص. 42-29

بهینه‌سازی فرآیند تولید قرص فشرده گوجه‌فرنگی بر مبنای ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و حرارتی در شرایط هوای گرم با پیش تیمار مایکروویو

منوچهر رشیدی[1]- رضا امیری چایجان[2*]- علی قاسمی[3]

تاریخ دریافت: 1397/11/08
تاریخ پذیرش: 1398/03/21

چکیده

در این پژوهش اثر متغیرهای خشک‌کردن به شیوه هوای گرم با اعمال پیش تیمار مایکروویو شامل دمای هوا، سرعت هوا و مدت زمان مایکروویو بر ویژگی‌های فیزیکی (چروکیدگی و چگالی واحد)، مکانیکی (مقاومت به نفوذ) و حرارتی (ضریب انتشار مؤثر رطوبت و انرژی مصرفی خشک‌کردن) قرص فشرده تولید شده از پودر گوجه‌فرنگی مورد بررسی قرار گرفت. فرآیند خشک‌کردن نمونه‌ها در پنج سطح دمایی 40، 50، 60، 70 و 80°C، پنج سطح سرعت هوا 0/5، 1، 1/5، 2 و 2/5 m/s و پنج زمان مختلف فرآیند مایکروویو صفر (بدون اعمال مایکروویو)، 4، 8، 12 و 16 s در توان ثابت 90 W صورت گرفت. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها و بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن با استفاده از روش سطح پاسخ انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از پیش‌تیمار مایکروویو سبب کاهش زمان خشک‌کردن و انرژی مصرفی آن و همچنین اثر معنی‌داری بر بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی قرص‌های فشرده تولید شده داشت. افزایش دمای هوای خشک‌کردن بر ضریب انتشار مؤثر رطوبت و چروکیدگی اثر مثبت و بر انرژی ویژه مصرفی خشک‌کردن، مقاومت به نفوذ و بر چگالی واحد اثر منفی داشت. با افزایش مدت زمان مایکروویو مقدار ضریب انتشار مؤثر رطوبت افزایش و با کاهش آن مقدار چروکیدگی محصول کاهش یافت. نقطه بهینه خشک‌کردن قرص فشرده تولید شده از پودر گوجه‌فرنگی در دمای 50°C، سرعت هوا 1 m/s و مدت زمان مایکروویو 4 s به‌دست آمد. خشک‌کردن تحت شرایط کمترین دما (40°C) وکمترین زمان مایکروویو (4 s) سبب بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی قرص فشرده گردید.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، پیش‌تیمار مایکروویو، قرص فشرده گوجه‌فرنگی، خشک‌کردن.

مقدمه

گوجه‌فرنگی (*Lycopersicum esculentum*) یکی از محبوب‌ترین محصولات باغی در سطح جهان به‌شمار می‌آید که پس از سیب‌زمینی دومین سبزی پرمصرف دنیا است. ایران با تولید حدود 6 درصد از تولید گوجه‌فرنگی دنیا، رتبه هفتم در تولید این محصول را دارد (FAO, 2017). گوجه‌فرنگی حاوی مواد مغذی مفیدی از جمله لیکوپن، اسید فنولیک و اسید آسکوربیک (ویتامین ث) است که برای سلامت انسان لازم می‌باشند. وجود لیکوپن در رژیم غذایی روزانه انسان سبب جلوگیری از خطر ابتلا به سرطان پروستات، بیماری‌های قلبی و عروقی و بیماری آب‌مروارید می‌شود (Demiray *et al.*, 2013).

گوجه‌فرنگی در فصل برداشت آن به‌صورت مازاد تولید می‌شود، این در حالی است که در سایر فصول سال مقدار گوجه‌فرنگی تولید شده جواب‌گوی نیاز بازار مصرف نیست. محتوای رطوبت بالای گوجه‌فرنگی سبب فسادپذیری سریع این محصول و کاهش زمان ماندگاری پس از برداشت آن می‌گردد، بنابراین نبود روش‌های مناسب برای فرآوری و نگهداری طولانی مدت این محصول منجر به بروز خسارت مالی قابل توجهی می‌گردد (Liu *et al.*, 2010). خشک‌کردن یکی از این روش‌های پر استفاده در نگهداری و فرآوری مواد غذایی از جمله گوجه‌فرنگی است (And & Barrett, 2006). تولید پودر یک روش مناسب برای افزایش زمان نگهداری و عمر مفید مواد غذایی است. پودر گوجه‌فرنگی یکی از فرآورده‌های تولید شده از گوجه‌فرنگی خشک‌شده است که امروزه این محصول در جهان بازار خاصی را در اختیار دارد. پودر گوجه‌فرنگی دارای مزایای بسیاری از جمله ارزش تجاری بالا، مدیریت بهتر در بسته‌بندی و حمل و نقل آسان می‌باشد. علاوه بر این، تولیدکنندگان مواد غذایی از پودر گوجه‌فرنگی به‌عنوان یک ماده افزودنی در بسیاری از محصولات غذایی، به‌ویژه، سوپ، غذای فوری و سس گوجه‌فرنگی استفاده می‌کنند (Liu *et al.*, 2010). پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که امروزه از پودر میوه به عنوان حامل‌های سلول‌های پروبیوتیک (Nualkaekul *et al.*,

1، 2 و 3- به‌ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشیار و دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.
(* - نویسنده مسئول: Email: amirireza@basu.ac.irr)
DOI: 10.22067/ifstrj.v16i2.78894

2012) ، در تولید آب‌نبات (da Silva *et al.*, 2016)، قرص غذای فشرده[1] (Shamsudin ؛Yusof *et al*., 2012 ؛Adiba *et al*., 2011 ؛*et al*., 2012 (Widodo & Hassan, 2015) و قرص‌های میوه با قابلیت تجزیه بالا (Zea *et al*., 2013) استفاده شده‌اند.

متراکم‌کردن پودر میوه تا سطح خاصی و تبدیل آن به شکل قرص سبب کاهش حجم و سطح پودر میوه می‌شود، در نتیجه احتمال انجام واکنش‌های تجزیه شیمیایی و تخریب مواد مغذی آن کاهش می‌یابد. اگر چه قرص‌سازی در حال حاضر یک فرآیند پر کاربرد در صنایع دارویی و متالورژی است، ولی تولید قرص غذایی فناوری جدیدی است که با سرعت در صنعت مواد غذایی در حال توسعه است (Aziz *et al*., 2018). داشتن دانش فنی در هر یک از فرآیندهای تولید قرص فشرده در طراحی تجهیزات مناسب به منظور فرآوری بسیار مهم است (Aziz *et al*., 2018). با توجه به اطلاعات کمی که در تولید قرص‌های غذایی وجود دارد، مطالعه پارامترهای اثرگذار بر فرآیندهای قرص سازی از اهمیت خاصی برخوردار است. تا کنون پژوهش‌هایی در مورد شکل‌گیری قرص از پودرهای پیتایا، انبه، گواوا، خرما، اسپیرونا و نارنگی گزارش شده است (Adiba *et al*., 2011؛ Zea *et al.*, 2013؛ Yusof *et al*., 2012؛Zhang *et al*., 2012؛ Ong *et al*., 2014, ؛).

محتوای رطوبتی مناسب برای ذخیره‌سازی قرص‌ها به مدت بیشتر از چهار ماه برابر با 11 تا 13% d.b. است (Samuelsson *et al*., 2012). خشک‌کردن به شیوه هوای گرم یکی از رایج‌ترین روش‌های موجود در صنعت است، به‌طوری که بیش از 85% خشک‌کن‌های موجود در صنعت از نوع همرفتی هوای گرم هستند (Zarein *et al*., 2015). اگر چه این روش رایج‌ترین روش صنعتی خشک‌کردن محصولات کشاورزی است، اما به دلیل زمان طولانی و انرژی حرارتی بالای آن، سبب تخریب مواد مغذی، چروکیدگی و تغییرات رنگ محصول می‌شود (Figiel, 2010). امواج مایکروویو با فرکانس 300 تا 300000 مگاهرتز بخشی از امواج الکترومغناطیس محسوب می‌شوند که قابلیت نفوذ بالایی دارند. بر خلاف روش خشک‌کردن همرفتی، در روش مایکروویو، انرژی گرمایی از طریق واکنش مولکول‌ها در میدان الکترومغناطیسی مستقیماً به ماده منتقل می‌شود (زرین‌نژاد و امیری چایجان، 1395). خشک‌کن‌های مایکروویو زمان خشک‌کردن را تا 99% کاهش می‌دهند (Śledź *et al*., 2013). به همین علت معمولاً در صنعت، از خشک‌های مایکروویو و هوای گرم به‌صورت ترکیبی برای کاهش زمان خشک کردن محصولات استفاده می‌شود (حشمتی و سیفی، 1396). چروکیدگی از جمله تغییرات فیزیکی نامطلوب درساختار بافت گیاهی در طول خشک‌کردن است که هم روی بافت وهم روی کیفیت محصول تأثیرگذار است (زرین‌نژاد و امیری‌چایجان، 1395).

با توجه به مطالب گفته شده و اهمیت فرآوری گوجه‌فرنگی، به طور کلی اهداف این پژوهش عبارت‌اند از: بررسی اثر متغیرهای مستقل (دمای هوا، سرعت هوا و مدت اعمال پیش‌تیمار مایکروویو) بر متغیرهای پاسخ (چگالی واحد ، چروکیدگی، مقاومت به نفوذ، ضریب انتشار مؤثر رطوبت و انرژی ویژه مصرفی خشک‌کردن) طی فرآیند خشک‌کردن قرص فشرده گوجه‌فرنگی به شیوه هوای گرم با اعمال پیش‌تیمار مایکروویو و تعیین شرایط بهینه برای خشک کردن قرص فشرده گوجه‌فرنگی به کمک روش سطح پاسخ.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی و خشک‌کردن ورقه‌های گوجه‌فرنگی

گوجه‌فرنگی تازه با قطر متوسط بین 4 تا 6 cm از میدان میوه و تره‌بار استان همدان تهیه گردید. رطوبت اولیه گوجه‌فرنگی‌ها با استفاده از روش آون هوای داغ (سه نمونه 10 گرمی در دمای 60°C به مدت 48 ساعت) تعیین شد که مقدار آن برابر با 1606/5% d.b. به‌دست آمد (Marfil *et al*., 2008). به‌منظور تسریع در فرآیند خشک‌کردن، ابتدا پوست نازک گوجه‌فرنگی‌ها به شیوه غوطه‌وری در آب داغ با دمای حدود 50°C به مدت 30 s به کمک دست جدا شد و سپس نمونه‌ها به‌وسیله یک تیغ تیز در ضخامت‌های 3 mm برش خوردند. ورقه‌های گوجه‌فرنگی روی فویل‌های آلومینیومی قرار گرفته و به‌وسیله یک خشک‌کن نیمه‌صنعتی به شیوه هوای گرم در دمای 50°C در سرعت هوای 1 m/s خشک شدند. خشک شدن در شرایط دمایی بین 50 تا 60°C مواد مغذی گوجه‌فرنگی به‌ویژه ویتامین ث و لیکوپن آن را به‌صورت قابل قبولی حفظ می‌کند (Purkayastha *et al*., 2013). فرآیند خشک‌کردن نمونه‌ها تا رسیدن محتوای رطوبتی آن ها به زیر 10% d.b.، رطوبت مناسب جهت پودر کردن محصول، ادامه یافت.

فرآیند پودر کردن

ورقه‌های خشک گوجه‌فرنگی با استفاده از یک دستگاه آسیاب خانگی (پاناسونیک، MJ-M176P، مالزی) به مدت یک دقیقه آسیاب و پودر شدند. به‌منظور همگن کردن اندازه ذرات، پودر گوجه‌فرنگی حاصل توسط یک الک آزمایشگاهی با مش شماره 50 (اندازه منافذ 0/5 mm) الک و ذرات باقی‌مانده روی آن مجدداً آسیاب شدند، بنابراین، اندازه ذرات پودر مورد استفاده برای فرآیند قرص‌سازی کمتر از 0/5 mm بودند.

---
1 Food Tableting

تهیه خمیر گوجه‌فرنگی قبل از فرآیند قرص‌سازی

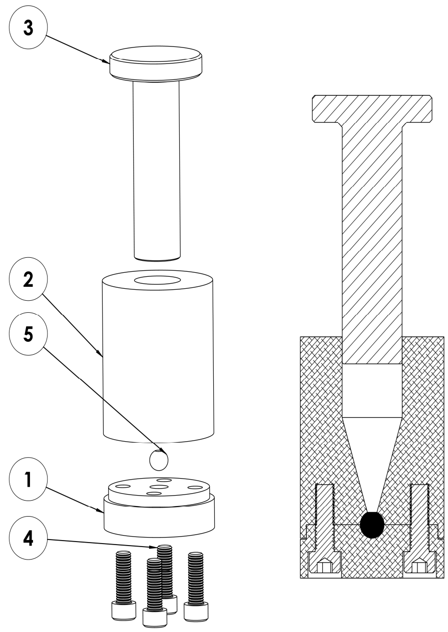
با توجه به پیش آزمایش‌های انجام شده، محتوای رطوبتی مناسب به‌منظور ایجاد چسبندگی کافی بین ذرات پودر گوجه‌فرنگی %23 d.b. انتخاب شد. با توجه به حلالیت بالای فروکتوز در آب و درصد بالای مونوساکارید آن از شربت فروکتوز با غلظت 55 درصد به‌عنوان ماده چسبان استفاده شد. وزن آب مورد نیاز جهت رساندن محتوای رطوبتی پودر گوجه‌فرنگی به %23 d.b. از رابطه 1 تعیین شد. شربت فروکتوز به نسبت 6 درصد وزنی (نسبت به وزن خام پودر گوجه‌فرنگی) در آب حل شد و محلول به‌دست‌آمده به پودر گوجه‌فرنگی اضافه شد. خمیر به‌دست‌آمده به مدت 72 ساعت در یخچال در دمای 4°C نگهداری شد تا فرآیند جذب رطوبت انجام شود.

$$W_w = \frac{W_i\left(M_f - M_i\right)}{100 - M_f} \quad (1)$$

که W_w وزن آب اضافه‌شده به پودر (g)، W_i وزن اولیه پودر (g)، M_f رطوبت نهایی (d.b.) و M_i رطوبت اولیه (d.b.) هستند.

فرآیند قرص‌سازی از پودر گوجه‌فرنگی

فرآیند تولید قرص‌های کروی شکل گوجه‌فرنگی، توسط یک دستگاه پرس هیدرولیک آزمایشگاهی و قالب ته بسته نشان داده شده در شکل 1، انجام شد. این قالب از سه بخش اصلی شامل فک بالایی، فک پایینی و یک پیستون تشکیل شده است. پس از رسیدن فشار روغن هیدرولیک در فرآیند قرص‌سازی به 75 bar، حرکت پیستون به مدت 15 ثانیه به‌منظور آزادسازی تنش‌های موجود در بافت محصول متوقف می‌شد (Wongsiriamnuay & Tippayawong, 2015) و سپس فشار از روی مواد برداشته می‌شد. در پایان، دو فک بالایی و پایینی به آهستگی از هم جداشده و قرص تشکیل شده از قالب خارج می‌شد.

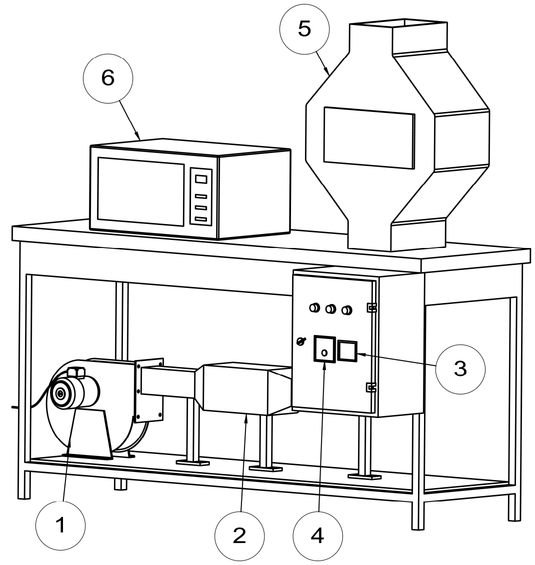


شکل 1- نمای برش‌خورده از قالب تشکیل قرص‌های کروی شکل (1- فک پایینی، 2- فک بالایی، 3- پیستون، 4- پیچ‌های نگهدارنده و 5- قرص کروی).

فرآیند خشک‌کردن قرص‌های فشرده

آزمایش‌های خشک‌کردن قرص‌های فشرده مرطوب بلافاصله پس از پایان فرآیند قرص‌سازی با استفاده از یک دستگاه خشک‌کن هوای‌گرم با پیش تیمار ماکروویو، نشان داده شده در شکل 2، انجام شدند. در این پژوهش به‌منظور اعمال پیش‌تیمار ماکروویو از یک دستگاه مایکروویو (شارپ، R959SLMA، تایلند) استفاده شد. این دستگاه برای مدت روشن بودن در توان مایکروویو، دارای تفکیک زمانی یک ثانیه بود. آزمایش‌های خشک‌کردن در پنج سطح دمایی 40، 50، 60، 70 و 80°C، پنج سطح سرعت جریان هوای 0/5، 1، 1/5، 2 و 2/5 m/s و پنج زمان مختلف فرآیند مایکروویو صفر (بدون اعمال ماکروویو)، 4، 8، 12 و 16 s در توان ثابت 90 W انجام شدند. سرعت هوا توسط یک سرعت‌سنج توربینی لوترون مدل YK80AM در محل قرارگیری نمونه‌ها اندازه‌گیری و با تنظیم سرعت دورانی فن به مقدار مورد نظر رسید. طی فرآیند خشک‌کردن، دمای داخل محفظه توسط یک ترموستات (آتبین، ایران) با درجه تفکیک 1°C که به یک ترموکوپل نوع K متصل بود کنترل می‌شد. در هر آزمایش حدود

400 g قرص خشک می‌شد. طی مرحله خشک شدن در فواصل زمانی مشخصی، نمونه‌ها از خشک‌کن خارج و محتوای رطوبتی آنها تعیین می‌شدند. آزمایش‌ها تا رسیدن به محتوای رطوبتی %10 d.b. ادامه یافت.



شکل 2- شماتیکی از دستگاه خشک‌کن هوای گرم - ماکروویو (1- دمنده شعاعی، 2- المنت‌های حرارتی، 3- کنترل‌کننده سرعت هوا، 4- سیستم کنترل دما، 5- محفظه خشک‌کن و 6- دستگاه مایکروویو).

چروکیدگی

چروکیدگی قرص‌های تولید شده با تعیین حجم نمونه‌ها قبل و بعد از فرآیند خشک‌کردن محاسبه شد. به این ترتیب که برای هر آزمایش قطر سه نمونه قرص کروی (در سه جهت عمود بر هم)، قبل و بعد از خشک‌کردن توسط یک کولیس دیجیتال اندازه‌گیری و میانگین هندسی آن‌ها به‌عنوان قطر نمونه در نظر گرفته شد (احمدی قویدلان وامیری چایجان، 1396). حجم قرص کروی قبل و بعد از فرآیند خشک‌کردن از معادله 2، به‌دست آمد. و در نهایت درصد چروکیدگی از معادله 3، محاسبه شد.

$$V = \frac{4}{3}\pi(\frac{D}{2})^3 \qquad (2)$$

$$S = (1-\frac{V_w}{V_d})\times 100 \qquad (3)$$

که در این روابط، D میانگین قطر هندسی نمونه‌ها (mm)، S درصد چروکیدگی، V_w و V_d به ترتیب حجم قرص‌های کروی (mm^3) قبل و بعد از فرآیند خشک‌کردن هستند.

چگالی واحد

چگالی واحد هر یک از قرص‌های کروی خشک‌شده با اندازه‌گیری جرم و حجم آنها تعیین شدند. برای این منظور پس از محاسبه حجم قرص کروی و اندازه‌گیری جرم آن توسط یک ترازوی دیجیتال با دقت 0/001 g، چگالی واحد با تقسیم جرم قرص به حجم آن محاسبه شد (Tumuluru *et al.*, 2011). چگالی واحد گزارش شده در این پژوهش میانگین اندازه‌گیری شده برای پنج قرص کروی است.

مقاومت به نفوذ

مقاومت به نفوذ قرص‌های فشرده، توسط آزمـون استاندارد پانچری تعیین شدند. این آزمون با استفاده از دستگاه آزمون کشش و فشار مـواد غـذایی (bt1_fr0.5th.d14 ،Zwick/roell، آلمان) انجام شد. برای این منظور یک قرص بین یک صفحه تخت و میله نفوذ با قطر 4/5 mm قرار می‌گرفت و با نرخ بارگذاری ثابت 30 mm/min تا هنگام ترک برداشتن و شکستگی نمونه فشرده می‌شد و مقدار نیرو و جابجایی در هر لحظه ثبت می‌شدند. بیشترین نیروی ثبت شده در طی این آزمون به‌عنوان مقاومت به نفوذ نمونه در نظر گرفته شد. مقاومت فشاری نمونه‌ها در سه تکرار اندازه‌گیری شد (ندیم و احمدی، 1395).

ضریب انتشار مؤثر رطوبت

ضریب انتشار مؤثر رطوبت بر اساس قانون دوم فیک در مختصات کروی تعیین شد. برای این منظور، با رسم نمودار لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت بر حسب زمان و برازش یک خط به آن و محاسبه شیب این خط (m) و با فرض اینکه چروکیدگی قابل صرف

نظر کردن باشد و توزیع رطوبت درون قرص یکنواخت است، مقدار ضریب انتشار مؤثر رطوبت با استفاده از معادله 4 محاسبه شد.

$$D_{eff} = \frac{mr^2}{\pi} \quad (4)$$

که در این رابطه D_{eff} ضریب انتشار مؤثر رطوبت (m^2/s) و r شعاع قرص فشرده کروی است (زرین‌نژاد و امیری چایجان، 1395).

انرژی ویژه مصرفی خشک‌کردن

انرژی ویژه مصرفی فرآیند خشک‌کردن قرص فشرده به شیوه هوای‌گرم با پیش‌تیمار مایکروویو، از مجموع انرژی صرف شده برای خشک‌کردن به شیوه همرفتی هوای گرم (SEC_1) و مایکروویو (SEC_2) به‌دست آمد. انرژی ویژه مصرفی خشک‌کردن به شیوه همرفتی هوای گرم از رابطه 5 محاسبه گردید (زرین‌نژاد و امیری چایجان، 1395).

$$SEC_1 = \left(C_{pa} + C_{pv}h_a\right)Qt\frac{(T_{in} - T_{am})}{m_v V_h} \quad (5)$$

که SEC_1 انرژی ویژه مصرفی خشک‌کردن به شیوه همرفتی (kJ/kg)، C_{Pa} ظرفیت گرمای ویژه هوا (1/8288 kJ/kg°C)، C_{Pv} ظرفیت گرمای ویژه بخار (1/00416 kJ/kg°C)، h_a رطوبت مطلق هوا ($kg_{Vaper}/kg_{dry\ air}$)، Q دبی هوا (m^3/s)، t زمان فرآیند خشک شدن (s)، T_{in} دمای هوای ورودی به اتاقک خشک‌کن (°C)، T_{am} دمای محیط (°C)، m_v جرم آب حذف شده از محصول طی فرآیند خشک‌کردن (kg) و V_h حجم ویژه هوا (m^3/kg) هستند.

انرژی ویژه مصرفی خشک‌کردن پیش‌تیمار مایکروویو از رابطه 6 محاسبه گردید (زرین‌نژاد و امیری چایجان، 1395).

$$SEC_2 = \frac{P_{MW}\, t}{m_v} \quad (6)$$

که در این رابطه، SEC_2 انرژی ویژه مصرفی خشک‌کردن به شیوه مایکروویو (kJ/kg)، P_{MW} توان مصرف شده مایکروویو (kW) و t زمان اعمال پیش‌تیمار مایکروویو (s) هستند.

بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن قرص فشرده تولید شده از پودر گوجه‌فرنگی

به‌منظور بررسی آماری اثر متغیرهای مستقل بر متغیرهای پاسخ مورد مطالعه و همچنین تعیین شرایط بهینه فرآیند خشک کردن از روش سطح پاسخ به شیوه طرح مرکب مرکزی استفاده شد (احمدی قویدلان و امیری چایجان، 1396). برای این منظور از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت نسخه 10 استفاده شد. شکل کلی معادله مرتبه دوم سطوح پاسخ در رابطه 7 نشان داده شده است.

$$Y = b_0 + \sum_{j=1}^{k} b_i X_i + \sum_{i<j}\sum b_{ij} X_i X_j + \sum_{j=1}^{k} b_{ij} X_j^2 \quad (7)$$

که Y پاسخ متغیرهای وابسته مورد مطالعه (ضریب انتشار مؤثر رطوبت، چروکیدگی، انرژی ویژه مصرفی، مقاومت به نفوذ و چگالی واحد)، b_0 عرض از مبدأ، b_i، b_{ii} و b_{ij} به‌ترتیب ضرایب خطی، درجه دو و اثر متقابل رابطه، X_j و X_i متغیرهای مستقل مورد بررسی هستند. جداول 1 و 2 به ترتیب، متغیرهای مستقل به همراه سطوح کدبندی شده آنها و تعداد آزمایش‌ها را نشان می‌دهند.

جدول 1- سطوح کدبندی‌شده متغیرهای مستقل مورد مطالعه و سطوح آن ها

متغیرهای مستقل	نماد	سطوح کدبندی‌شده متغیرها				
		-2	-1	0	1	2
دمای هوای (°C)	X_1	40	50	60	70	80
سرعت هوا (m/s)	X_2	0/5	1	1/5	2	2/5
مدت اعمال مایکروویو (s)	X_3	0	4	8	12	16

برای تعیین شرایط بهینه با توجه به اهداف مورد مطالعه، ضریب اهمیت متغیرهای ضریب انتشار مؤثر رطوبت و مقاومت به نفوذ برابر 5 (بیشترین اهمیت)، چروکیدگی و چگالی واحد برابر 3 و انرژی ویژه مصرفی برابر 1 (کمترین اهمیت) انتخاب شدند.

نتایج و بحث

ضرایب معادله رگرسیونی حاصل از روش سطح پاسخ و اطلاعات آماری به‌دست‌آمده برای متغیرهای پاسخ در جدول 3 آورده شده است.

با توجه به مقادیر آماری ارائه شده در جدول 3 مشاهده می‌شود که مقدار ضریب تبیین (R^2) برای تمامی مدل‌های ارائه شده بالاتر از 0/96 و ضریب تغییرات برای تمامی مدل‌ها کمتر از 8/5 بود به جز ضریب انتشار مؤثر رطوبت که مقدار ضریب تغییرات برای آن برابر 31/75 به دست آمد، بنابراین مقادیر پایین ضریب تغییرات (8≈) برای اغلب مدل‌های پیشنهادی در جدول 3 نشان‌دهنده تکرارپذیری خوب این مدل‌ها می‌باشد (Ghasemi *et al*., 2018). همچنین با توجه به معنی‌دار نشدن فاکتور عدم برازش برای همه متغیرهای مورد بررسی

به جز ضریب انتشار مؤثر رطوبت، می‌توان گفت که مدل‌های ارائه شده به روش سطح پاسخ به‌خوبی توانسته‌اند مقدار تغییرات متغیرهای وابسته را پیش‌بینی کنند. با این وجود، معنی‌دار شدن عدم برازش برای ضریب انتشار رطوبت نشان می‌دهد که مدل ریاضی ارائه شده به‌منظور پیش‌بینی دقیق این متغیر پاسخ مناسب نیست.

جدول 2- آزمایش‌های انجام شده برای بررسی اثر متغیرهای پاسخ بر فرآیندهای قرص‌سازی از پودر گوجه‌فرنگی و خشک‌کردن آن ها به روش سطح پاسخ

شماره آزمایش	سطوح متغیرهای مستقل (سطوح کدبندی)			تکرار
	دمای هوا (°C)	سرعت هوا (m/s)	مدت اعمال مایکروویو (s)	
1	60 (0)	1/5 (0)	8 (0)	6
2	60 (0)	1/5 (0)	0 (-2)	1
3	50 (-1)	1 (2)	4 (-1)	1
4	80 (2)	1/5 (0)	8 (0)	1
5	50 (-1)	2 (1)	4 (-1)	1
6	70 (1)	1 (-1)	12 (1)	1
7	70 (1)	1 (-1)	4 (-1)	1
8	50 (-1)	1 (-1)	12 (1)	1
9	70 (1)	2(1)	12(1)	1
10	50 (-1)	2 (1)	12 (1)	1
11	60 (0)	1/5 (0)	16 (-2)	1
12	70 (1)	2 (1)	4 (-1)	1
13	40 (-2)	1/5 (0)	8 (0)	1
14	60 (0)	2/5 (2)	8(0)	1
15	60 (0)	0/5 (-2)	8 (0)	1

چروکیدگی

بیشترین مقدار چروکیدگی (25/6%) در شرایط خشک‌کردن دمای هوای 80°C، سرعت هوا 1/5 m/s و مدت اعمال مایکروویو 8 s به دست آمد. کمترین مقدار چروکیدگی (10/5%) نیز تحت شرایط دمای هوای ورودی به محفظه خشک‌کن 40°C، سرعت هوا 1/5 m/s و مدت اعمال مایکروویو 8 s به‌دست آمد. با توجه به نتایج جدول 3، مشاهده شد که اثر خطی دمای هوا ، مدت اعمال مایکروویو و همچنین اثر متقابل و عبارت درجه دوم آنها بر چروکیدگی قرص‌های فشرده‌شده معنی‌دار بودند. شکل 3 اثر متقابل دمای هوای ورودی به محفظه خشک‌کن و مدت اعمال مایکروویو بر چروکیدگی قرص‌های فشرده‌شده گوجه‌فرنگی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش هم‌زمان دمای هوای ورودی و مدت اعمال مایکروویو، مقدار چروکیدگی نیز افزایش یافت، همچنین اثر دما از مدت اعمال مایکروویو بیشتر بود. طی فرآیند خشک کردن، خروج آب از بافت محصول با اعمال تنش به دیواره سلولی آن سبب ایجاد چروکیدگی می‌گردد. به دلیل آنکه طی فرآیند خشک شدن، آب موجود در دیواره بین سلولی از محصول تبخیر شده و هوا جایگزین آن می‌شود، در نتیجه بافت قادر به نگه‌داری شبکه ساختمانی نمی‌باشد و ساختمان بیرونی سلول فرومی‌ریزد وچروکیدگی ایجاد می‌شود (زرین‌نژاد و امیری‌چایجان، 1395). به‌طورکلی، حرارت‌دهی و حذف رطوبت از ماده غذایی با ایجاد گرادیان های دمایی و رطوبتی درون محصول سبب ایجاد تغییر شکل و اندازه محصول می‌گردد. مایع موجود در دیواره سلولی مواد بیولوژیکی، فشاری را بر دیواره سلول وارد می‌کند که به آن فشار ترگر[1] می‌گویند که سبب فشرده شدن مایع درون سلول می‌گردد. در طی فرآیند خشک‌شدن با خروج آب از سلول، نیروی کششی که آب بر دیواره سلول وارد می‌کند کاسته شده و همین کاهش کشش سبب چروکیده شدن ماده می‌گردد (احمدی قویدلان و امیری چایجان، 1396). بیشترین درصد چروکیدگی در ابتدای فرآیند خشک شدن که نرخ تبخیر آب بالا می‌باشد رخ می‌دهد. به‌منظور جلوگیری از ایجاد گرادیان‌های شدید حرارتی و رطوبتی درون محصول که منجر به ایجاد چروکیدگی محصول می‌گردند،

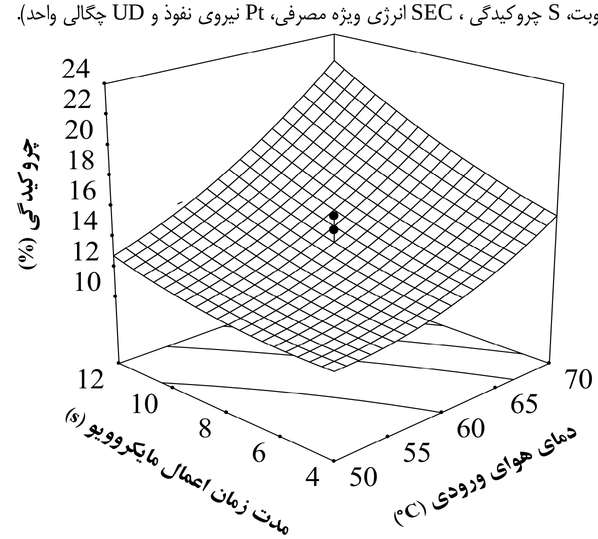
[1] Turgor

دماهای پایین خشک‌کردن به‌منظور جلوگیری از ایجاد چروکیدگی درون محصول توصیه می‌گردد (Artnaseaw *et al.*, 2010).

جدول 3- ضرایب مدل برازش شده به معادله رگرسیونی درجه دوم برای متغیرهای پاسخ (X_1 دمای هوا، X_2 سرعت هوا و X_3 مدت اعمال مایکروویو در توان ثابت 90 W)

منابع تغییرات	ضرایب مدل				
	D_{eff} (m^2/s)	S (%)	SEC (GJ/kg)	Pt (N)	UD (g/cm^3)
عرض از مبدأ (b_0)	$+4/53\times10^{-9}$	+13/46	+8602/34	+19/19	+1/22
عبارت خطی					
(b_1) X_1	$+2/55\times10^{-8}$ [a]	+3/47[a]	-3786/39[a]	-6/94[a]	-0/32[a]
(b_2) X_2	$+4/54\times10^{-11}$ [ns]	+0/14[ns]	+1360/77[a]	+0/29[ns]	-0/057[c]
(b_3) X_3	$+1/33\times10^{-8}$ [a]	+2/13[a]	+38/05[ns]	-2/47[a]	-0/037[ns]
اثر متقابل					
(b_{12}) X_1X_2	$-2/04\times10^{-10}$ [ns]	-0/12[ns]	+990/13[a]	+0/13[ns]	+0/032[ns]
(b_{13}) X_1X_3	$+1/31\times10^{-8}$ [a]	+1/21[a]	-588/09[b]	+1/41[b]	-0/092[b]
(b_{23}) X_2X_3	$-1/44\times10^{-10}$ [ns]	+0/15[ns]	+36/27[ns]	+0/99[ns]	+0/009[ns]
عبارت درجه دوم					
(b_{11}) X_1^2	$+1/18\times10^{-8}$ [a]	+1/07[a]	+698/56[a]	+0/80[b]	+0/058[b]
(b_{22}) X_2^2	$+1/80\times10^{-10}$ [ns]	-0/28[ns]	+929/20[a]	+0/62[ns]	-0/036[ns]
(b_{33}) X_3^2	$+6/83\times10^{-9}$ [a]	+0/57[b]	+533/40[a]	+0/29[a]	+0/057[b]
Lack of Fit (P-value)	0/0046[a]	0/78[ns]	0/05[ns]	0/74[ns]	0/16[ns]
Model (P-value)	0/0001[a]	0/0001[a]	0/0001[a]	0/0001[a]	0/0001[a]
R^2	0/98	0/97	0/98	0/96	0/98
C.V. (%)	3/75	6/47	6/38	8/55	5/35
Std. Dev.	$6/22\times10^{-9}$	0/96	659/25	1/76	0/067

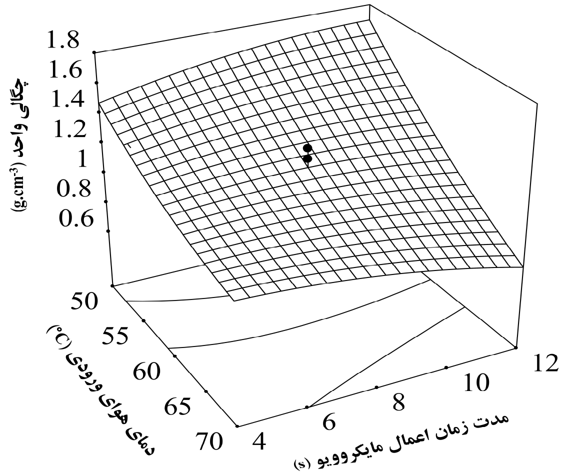
a بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال 0/1%، b اختلاف معنی‌دار در 1%، c اختلاف معنی‌دار در 5% و ns عدم اختلاف معنی¬دار می‌باشند. (D_{eff} ضریب انتشار مؤثر رطوبت، S چروکیدگی ، SEC انرژی ویژه مصرفی، Pt نیروی نفوذ و UD چگالی واحد).



شکل3- اثر متقابل دمای هوای ورودی به محفظه خشک‌کن و مدت اعمال مایکروویو بر چروکیدگی قرص‌های فشرده‌شده گوجه‌فرنگی.

چگالی واحد

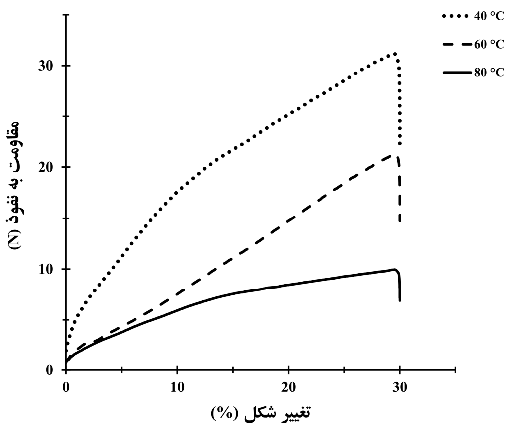
بیشترین و کمترین مقدار چگالی واحد برای قرص فشرده‌شده به ترتیب برابر با 2/2 و $0/75\ g/cm^3$ به‌دست آمد. نتایج تجزیه واریانس (جدول 3)، نشان داد که اثر خطی دمای هوای ورودی و سرعت هوا، اثر متقابل دمای هوای ورودی و مدت اعمال مایکروویو و عبارت درجه دوم دمای هوای ورودی و مدت اعمال مایکروویو بر چگالی واحد قرص فشرده گوجه‌فرنگی معنی‌دار بودند. شکل 4، اثر متقابل دمای هوای ورودی و مدت اعمال مایکروویو بر چگالی واحد قرص فشرده گوجه‌فرنگی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج قابل مشاهده است، با افزایش دمای هوای خشک‌کن، چگالی واحد کاهش یافت. دلیل احتمالی برای کاهش چگالی واحد با افزایش دما را می‌توان افزایش تجزیه بیشتر مواد مغذی موجود در قرص‌های فشرده با افزایش دما دانست که منجر به کاهش بیشتر وزن خشک آنها می‌گردد. یک دلیل احتمالی دیگر آن است که استفاده همزمان از انرژی حرارتی و مایکروویو سبب حذف سریع‌تر محتوای رطوبتی سطح نمونه شده و در نتیجه با افزایش گرادیان‌های محتوای رطوبتی سبب افزایش ترک‌های ریز درون نمونه می‌گردد، این ترک‌های ریز باعث ایجاد تغییرات حجم در محصول شده و در نتیجه چگالی واحد را کاهش می‌دهند (Ghasemi and Amiri Chayjan, 2018).



شکل 4- اثر متقابل دمای هوا و مدت زمان مایکروویو بر چگالی واحد قرص‌های فشرده‌شده گوجه‌فرنگی.

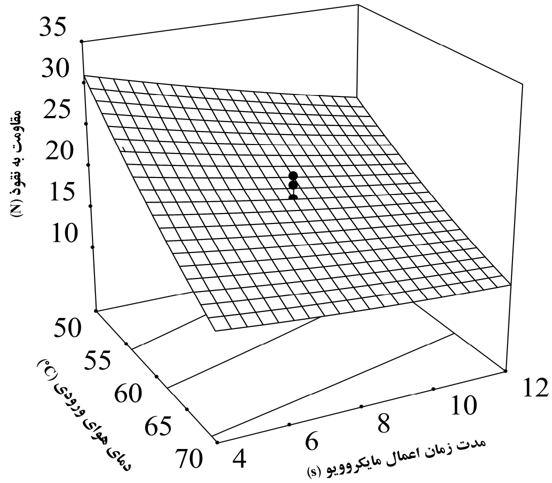
مقاومت به نفوذ

نتایج آزمون پانچری قرص فشرده گوجه‌فرنگی نشان داد که در نمودار نیرو- تغییر شکل آن می‌توان قسمت خطی و نقطه شکست را از هم تمیز داد. شکل 5 نمودار تغییرات نیرو- تغییر شکل مربوط به قرص فشرده گوجه‌فرنگی، خشک‌شده در دماهای 40، 60 و 80°C، سرعت هوای 1/5 m/s و مدت زمان مایکروویو 8 s را طی آزمون پانچری نشان می‌دهد.



شکل 5- نمودار نیرو- تغییر شکل قرص کروی شکل گوجه‌فرنگی، خشک‌شده در دماهای 40، 60 و 80°C، سرعت هوای 1/5 m/s و مدت زمان مایکروویو 8 s طی آزمون پانچری.

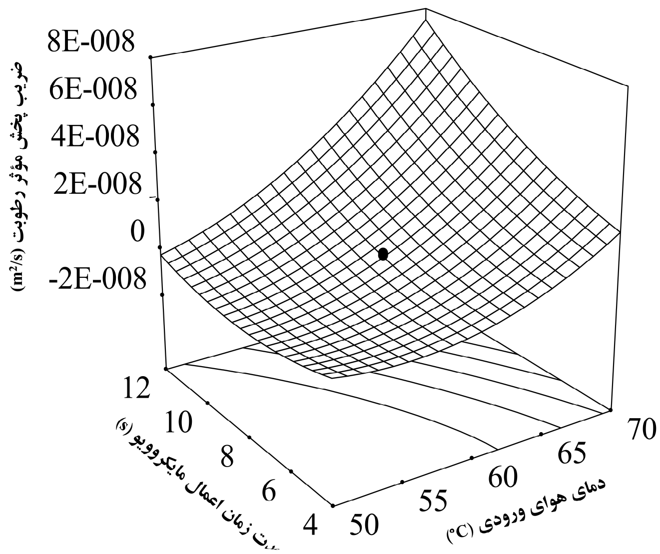
بیشترین مقدار مقاومت به نفوذ برابر با 31/2 N برای قرص‌های خشک شده تحت دمای 40°C، سرعت هوا 1/5 m/s و مدت زمان مایکروویو 8 s به دست آمد و همچنین کمترین مقدار آن برابر با 9/9 N برای قرص‌های خشک شده در دمای 80°C، سرعت هوا 1/5 m/s و مدت اعمال مایکروویو 8 s به‌دست آمد. نتایج تجزیه واریانس (جدول 3)، نشان داد که اثرات خطی دمای هوا و مدت زمان مایکروویو، اثر متقابل و درجه دوم آنها بر مقاومت به نفوذ قرص‌های گوجه‌فرنگی معنی‌دار بودند. شکل 6، اثر متقابل دمای هوا و مدت زمان مایکروویو بر نیروی نفوذ به قرص‌های فشرده را نشان می‌دهد. از نتایج این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش همزمان دمای خشک‌کردن و مدت زمان پیش تیمار مایکروویو، مقدار مقاومت به نفوذ کاهش یافت. دلیل این امر را می‌توان افزایش تنش‌های حرارتی و رطوبتی وارد شده به نمونه به دلیل افزایش دما دانست، زیرا این تنش ها سبب ایجاد ترک‌های ریز در بافت محصول شده و منجربه کاهش استحکام و انسجام بافت سلولی و انرژی مورد نیاز برای محصول می‌گردند. طی فرآیند خشک شدن به شیوه هوای‌گرم با پیش‌تیمار مایکروویو با اعمال انرژی بالای مایکروویو به سطح محصول ازآنجایی‌که رطوبت سطحی با سرعت بیشتری حذف می‌گردد، بنابراین گرادیان‌های محتوای رطوبتی بالاتری درون محصول ایجاد می‌گردد. همچنین با افزایش دما، مقدار این گرادیان‌ها نیز بیشتر می‌گردد. این گرادیان‌های رطوبتی عامل ایجاد ترک‌های سطحی در قرص هستند و سبب کاهش نیروی نفوذ قرص‌ها می‌گردند. این نتایج با نتایج به‌دست‌آمده سالک و قنبریان (1395) و Burubai و همکاران (2007) مطابقت دارد.



شکل 6- اثر متقابل دمای هوا و مدت اعمال مایکروویو بر نیروی نفوذ قرص‌های فشرده‌شده گوجه‌فرنگی.

ضریب انتشار مؤثر رطوبت

کمترین مقدار ضریب انتشار مؤثر رطوبت قرص فشرده برابر با $3/1\times10^{-11}$ m²/s تحت شرایط خشک‌کردن در دمای 40°C، سرعت هوا 1/5 m/s و مدت زمان مایکروویو 8 s و بیشترین مقدار آن برابر با $9/4\times10^{-8}$ m²/s در دمای 80°C، سرعت هوا 1/5 m/s و مدت زمان مایکروویو 8 s به‌دست آمد. طی پژوهشی روی فرآیند خشک‌کردن ورقه‌های گوجه‌فرنگی در سطوح دمایی 40، 50، 70 و 80°C و اعمال سه سطح توان مایکروویو 1/13، 2/08 و 3/11 W/g، مقدار ضریب انتشار مؤثر رطوبت بین $1/68\times10^{-9}$ تا $5/22\times10^{-8}$ m²/s گزارش شد (Workneh & Oke, 2013). با توجه به نتایج جدول 3، اثر خطی دمای هوای خشک‌کردن و مدت زمان مایکروویو و هم‌چنین اثر متقابل و درجه دوم آن ها بر ضریب انتشار مؤثر رطوبت معنی‌دار بود. شکل 7، اثر متقابل دمای هوای خشک کردن و مدت زمان مایکروویو بر ضریب انتشار مؤثر رطوبت را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج این شکل مشاهده می‌گردد هر دو عامل دمای خشک‌کردن و مدت زمان مایکروویو بر ضریب انتشار مؤثر رطوبت اثر مثبت داشتند، به‌طوری‌که با افزایش هم‌زمان آنها، مقدار ضریب انتشار مؤثر رطوبت افزایش یافت. دلیل این امر را می‌توان، افزایش نرخ تبخیر رطوبت از محصول در اثر افزایش انرژی حرارتی زمان شده به آن دانست. همچنین افزایش مدت زمان مایکروویو با بالا بردن انرژی جنبشی بین مولکول‌های آب منجر به افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت شد (امیری چایجان و همکاران،1396).



شکل7- اثر متقابل دمای هوای ورودی به محفظه خشک‌کن و مدت زمان مایکروویو بر ضریب انتشار مؤثر رطوبت قرص‌های فشرده‌شده گوجه‌فرنگی.

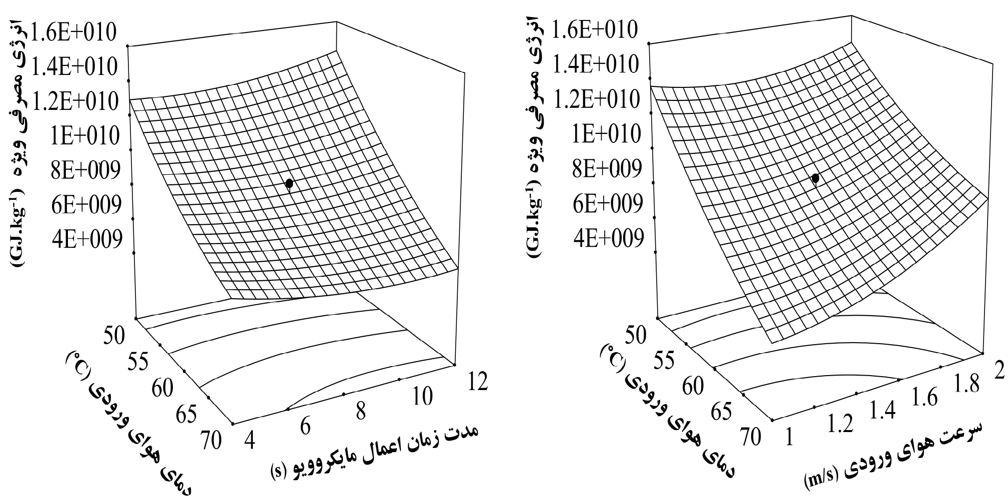
انرژی ویژه مصرفی خشک‌کردن

بیشترین و کمترین انرژی ویژه مصرفی به‌ترتیب درشرایط خشک‌کردن با دمای 40 و 80°C با سرعت هوای 1/5 m/s تحت شرایط زمان مایکروویو 8 s به‌دست آمد. با توجه به نتایج جدول 3 مشاهده شد که تأثیر خطی متغیرهای دمای هوا، سرعت هوا، همچنین اثر متقابل دمای هوا و سرعت هوا و اثر متقابل دمای هوا و مدت زمان مایکروویو و عبارت‌های درجه دوم همه مورد متغیرهای مورد بررسی بر انرژی مصرفی ویژه خشک‌کردن معنی‌دار بودند. شکل‌های 8 الف و 8 ب به‌ترتیب اثر متقابل دمای هوا و سرعت هوا و اثر متقابل دما و مدت زمان مایکروویو بر انرژی ویژه مصرفی خشک کردن قرص‌های فشرده را نشان می‌دهند. همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش دمای هوا و سرعت هوا به دلیل آن‌که زمان فرآیند خشک شدن کاهش می‌یابد، مقدار انرژی ویژه مصرفی خشک‌کردن نیز کاهش یافت. افزایش مدت زمان مایکروویو، مقدار انرژی مصرفی را در همه تیمارهای مورد آزمایش کاهش داد، با این وجود، افزایش دمای هوا نسبت به افزایش مدت زمان مایکروویو تأثیر بیشتری بر کاهش انرژی مصرفی خشک‌کردن داشت. از این‌رو افزایش دمای هوای خشک‌کردن علاوه بر کاهش مصرف انـرژی با کاهش زمان خشک‌کردن سبب افزایش ظرفیت تولید محصول می‌گردد، هرچند ممکن است افزایش دما سبب افت ویژگی‌های کیفی محـصول و بازارپـسندی آن گردد. انرژی ویژه مصرفی، تابع عوامل مختلفی مانند دمای هوا، سرعت هوا، گرمای ویژه هوا و گرمای نهان تبخیر آب می‌باشد. در دمای هوا و مدت زمان اعمال پیش تیمار مایکروویو، آب آزاد محصول سریع تر تبخیر شده و زمان خشک‌شدن به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می یابد و در اثر کاهش زمان خشک‌شدن، انرژی مصرفی کل کاهش می‌یابد. در حالت کلی، با افزایش دمای هوا و مدت زمان اعمال مایکروویو در سرعت هوای ثابت، انرژی مصرفی کل کاهش یافت. با ثابت نگه‌داشتن دمای هوا و افزایش مدت زمان اعمال مایکروویو، مقدار انرژی مصرفی کاهنده بود که تأثیر آن در دمای 60°C حداکثر بود. تاثیر توان مایکروویو بر کاهش مصرف انرژی در محدوده 8 تا 16 ثانیه نسبت به محدوده صفر تا 8 ثانیه بیشتر بود. که این امر به دلیل این است که تأثیر مدت زمان اعمال مایکروویو بر انرژی مصرفی بسیار بیشتر می باشد. در مدت زمان مایکروویو بیشتر، آب آزاد محصول سریع تر تبخیر شده و زمان خشک شدن به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و در اثر کاهش زمان خشک شدن، انرژی مصرفی کل کاهش می‌یابد. Kantrong و همکاران (2014) در خشک کردن قارچ، صفری و همکاران (1395) در خشک‌کردن بادام و احمدی قویدلان و چایجان (1396) در خشک‌کردن مغز فندق به نتایج مشابهی دست یافتند.

شرایط بهینه خشک‌کردن قرص فشرده تولید شده از پودر گوجه‌فرنگی

به‌منظور بهینه‌سازی هم‌زمان متغیرهای پاسخ از روش سطح پاسخ و تابع مطلوبیت استفاده شد. کمترین و بیشترین مقادیر به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها و ضریب اهمیت آن ها برای متغیرهای پاسخ مورد بررسی در جدول 4 آورده شده‌اند. با استفاده از روش سطح پاسخ و تابع مطلوبیت، دو نقطه بهینه با شاخص مطلوبیت بیشتر از 0/92 برای انجام فرآیند خشک‌کردن قرص فشرده گوجه‌فرنگی تعیین

شده که در جدول 5، ارائه شده است. نتایج به‌دست‌آمده از جدول 5 نشان می‌دهد که مطلوب‌ترین حالت برای قرص‌های فشرده گوجه‌فرنگی در شرایط خشک‌کردن هوای گرم در دمای 50°C، سرعت هوا 1 m/s و با اعمال پیش تیمار مایکروویو به مدت 4 s در توان 90 W به‌دست آمد. تحت این شرایط، شاخص مطلوبیت 0/93 بود و مقدار بهینه متغیرهای مستقل شامل ضریب انتشار مؤثر رطوبت، چروکیدگی، انرژی ویژه مصرفی خشک‌کردن، مقاومت به نفوذ و چگالی واحد به‌ترتیب برابر با $2/76\times 10^{-9}$ m²/s، 10/56%، $1/35\times10^{10}$ kJ/kg، 321/53 N و 1/55 g/cm به‌دست آمدند. نتایج نشان داد که خشک‌کردن تحت شرایط ملایم‌تر (دمای پایین‌تر و زمان کمتر مایکروویو) سبب افزایش شاخص مطلوبیت گردید.



شکل 8- الف) اثر متقابل دمای هوا و سرعت هوا بر انرژی ویژه مصرفی خشک‌کردن قرص‌های فشرده تولید شده از پودر گوجه‌فرنگی و ب) اثر متقابل دمای هوا و مدت زمان مایکروویو بر انرژی ویژه مصرفی خشک‌کردن قرص‌های فشرده

جدول 4- محدوده متغیرهای پاسخ و ضریب اهمیت آنها جهت بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن قرص گوجه‌فرنگی به روش سطح پاسخ

متغیرهای پاسخ	هدف	کمترین مقدار	بیشترین مقدار	ضریب اهمیت
ضریب انتشار مؤثر رطوبت (m²/s)	بیشینه	$3/11\times10^{-11}$	$9/4\times10^{-8}$	5
چروکیدگی (٪)	کمینه	10/38	25/6	3
انرژی ویژه مصرفی خشک‌کردن (kJ/kg)	کمینه	$3/57\times10^{9}$	$1/96\times10^{10}$	1
مقاومت به نفوذ (N)	بیشینه	9/01	35/04	5
چگالی واحد (g/cm)	بیشینه	0/75	2/19	3

جدول 5- مقادیر پیش‌بینی‌شده متغیرهای وابسته و مستقل به روش سطح پاسخ در شرایط بهینه فرآیند خشک‌کردن قرص فشرده گوجه‌فرنگی به روش سطح پاسخ

شماره	دما (°C)	سرعت هوا (m/s)	مدت زمان مایکروویو (s)	ضریب انتشار مؤثر رطوبت (m²/s)	چروکیدگی (%)	انرژی ویژه مصرفی خشک‌کردن (kJ/kg)	مقاومت به نفوذ (N)	چگالی واحد (g/cm)	شاخص مطلوبیت
1	50	1	4	$2/76\times10^{-9}$	10/56	$1/35\times10^{10}$	32/53	1/55	0/930
2	50	1	4/5	$4/21\times10^{-9}$	10/53	$1/35\times10^{10}$	31/91	1/54	0/924

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های خشک‌کردن قرص فشرده گوجه‌فرنگی به شیوه هوای گرم با اعمال پیش تیمار مایکروویو نتایج زیر از این پژوهش قابل استنتاج هستند: اثر دمای هوا و مدت زمان پیش‌تیمار مایکروویو بر همه متغیرهای پاسخ قرص فشرده گوجه‌فرنگی در خشک‌کن هوای گرم با پیش تیمار مایکروویو معنی‌دار

بود. افزایش دما و زمان پیش‌تیمار مایکروویو سبب افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت و چروکیدگی محصول نهایی گردید. دمای هوای ورودی به خشک‌کن بر مقاومت به نفوذ، چگالی واحد و انرژی ویژه مصرفی فرآیند خشک‌کردن اثر منفی داشت. خشک‌کردن تحت شرایط دمایی پایین‌تر و زمان کمتر پیش‌تیمار مایکروویو سبب افزایش شاخص مطلوبیت فرآیند خشک‌کردن گردید.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از دانشگاه بوعلی سینا که در تأمین مالی هزینه‌های این پژوهش ما را یاری نمودند و همچنین جناب آقای دکتر ابراهیم احمدی عضو هیئت‌علمی گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه بوعلی سینا که در انجام این پژوهش با ما همکاری نمودند تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

احمدی قویدلان، م و امیری چایجان، ر. (1396). استفاده از روش سطح پاسخ جهت بهینه‌سازی خشک‌کردن فندق در بسترسیال مادون‌قرمز. پژوهش های صنایع غذایی، 26(4): 639-657.

احمدی قویدلان، م و امیری چایجان، ر. (1396). بهینه‌سازی خشک‌کردن مغز فندق در خشک‌کن مادون قرمز با پیش‌تیمار مایکروویو به کمک روش سطح پاسخ. علوم و صنایع غذایی ایران، 14(64): 165-178.

خاکباز حشمتی، م و سیفی مقدم، ا. (1396). بررسی تکنیک متناوب مایکروویو-هوای گرم بر خواص کیفی و تغذیه‌ای برگه‌های کیوی خشک شده. پژوهش های صنایع غذایی، 27(1): 111-126.

زرین‌نژاد، م و امیری چایجان، ر. (1395). تعیین شرایط بهینه فرآیند خشک کردن پسته در خشک کن مایکروویو بستر سیال. مجله علوم و صنایع غذایی، 13(57): 13-24.

سالک، ف و قنبریان، د. (1395). اثر دما و رطوبت بر برخی از ویژگی‌های مکانیکی دانه سویا تحت بارگذاری شبه استاتیک. نشریه پژوهش های صنایع غذایی، 4(26): 705-714.

صفری، م، امیری‌چایجان، ر و علائی، ب. (1396). مدل‌سازی برخی خواص حرارتی و فیزیکی مغز بادام در خشک‌کن خلائی مادون قرمز با پیش‌تیمار میکروویو. مهندسی زراعی، 39(1): 21-37.

ندیم، ز و احمدی، ا. (1395). بررسی برخی خواص رئولوژیکی توت فرنگی پوشش‌دهی شده با متیل سلولز. ماشین‌های کشاورزی، 6(1): 153-162.

Adiba, B. D., Salem, B., Nabil, S., & Abdelhakim, M. (2011). Preliminary characterization of food tablets from date (Phoenix dactylifera L.) and spirulina (Spirulina sp.) powders. *Powder Technology*, 208(3), 725-730.

And, G. L., & Barrett, D. M. (2006). Influence of Pre-drying Treatments on Quality and Safety of Sun-dried Tomatoes. Part I: Use of Steam Blanching, Boiling Brine Blanching, and Dips in Salt or Sodium Metabisulfite. *Journal of Food Science*, 71(1), S24-S31.

Artnaseaw, A., Theerakulpisut, S., Benjapiyaporn, C. 2010. Development of a vacuum heat pump dryer for drying chilli. *Biosystems engineering*, 105(1), 130-138.

Aziz, M., Yusof, Y., Blanchard, C ,.Saifullah, M., Farahnaky, A., & Scheiling, G. (2018). Material Properties and Tableting of Fruit Powders. *Food Engineering Reviews*, 1-15.

Burubai, W., Akor, A., Igoni, A., Uyate, Y. 2007. Effects of temperature and moisture content on the strength properties of African nutmeg (*Monodora myristica*). Bulgarian *Journal of Agricultural Science*, 13(6), 703.

da Silva, L. B., Queiroz, M. B., Fadini, A. L., da Fonseca, R. C., Germer, S. P., & Efraim, P. (2016). Chewy candy as a model system to study the influence of polyols and fruit pulp (açai) on texture and sensorial properties. *LWT-Food Science and Technology*, *65*, 268-274.

Demiray, E., Tulek, Y., & Yilmaz, Y. (2013). Degradation kinetics of lycopene, β-carotene and ascorbic acid in tomatoes during hot air drying. *LWT-Food Science and Technology*, 50(1), 172-176.

Figiel, A. (2010). Drying kinetics and quality of beetroots dehydrated by combination of convective and vacuum-microwave methods. *Journal of Food Engineering*, 98(4), 461-470.

Ghasemi, A., & Chayjan, R. A. (2018). Optimization of Pelleting and Infrared-Convection Drying Processes of Food and Agricultural Waste Using Response Surface Methodology (RSM). *Waste and Biomass Valorization*, 1-19.

Kantrong, H., Tansakul, A., & Mittal, G. S. (2014). Drying characteristics and quality of shiitake mushroom undergoing microwave-vacuum drying and microwave-vacuum combined with infrared drying. *Journal of food science and technology*, 51(12), 3594-3608.

Liu, F., Cao, X., Wang, H., & Liao, X. (2010). Changes of tomato powder qualities during storage. *Powder Technology*, 204(1), 159-166.

Marfil, P., Santos, E., & Telis, V. (2008). Ascorbic acid degradation kinetics in tomatoes at different drying conditions. *LWT-Food Science and Technology*, 41(9), 1642-1647.

Nualkaekul, S., Deepika, G., & Charalampopoulos, D. (2012). Survival of freeze dried Lactobacillus plantarum in instant fruit powders and reconstituted fruit juices. *Food research international,* 48(2), 627-633.

Ong, M ,.Yusof, Y., Aziz, M., Chin, N., & Amin, N. M. (2014). Characterisation of fast dispersible fruit tablets made from green and ripe mango fruit powders. *Journal of Food Engineering, 125*, 17-23.

Purkayastha, M. D., Nath, A., Deka, B. C., & Mahanta, C. L. (2013). Thin layer drying of tomato slices. *Journal of food science and technology,* 50(4), 642-653.

Samuelsson, R., Larsson, S. H., Thyrel, M., & Lestander, T. A. (2012). Moisture content and storage time influence the binding mechanisms in biofuel wood pellets. *Applied energy,* 99, 109-115.

Shamsudin, I., Anuar, M., & Tahir, S. (2012). Compaction of sweet potato (*Ipomoea Batatas* L.) and stevia rebaudiana food powders. *Particulate Science and Technology,* 30(2), 136-144.

Śledź, M., Nowacka, M., Wiktor, A & ,.Witrowa-Rajchert, D. (2013). Selected chemical and physico-chemical properties of microwave-convective dried herbs. *Food and Bioproducts Processing,* 91(4), 421-428.

Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Hess, J. R., & Kenney, K. L. (2011). A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining,* 5(6), 683-707.

Widodo, R. T., & Hassan, A. (2015). Compression and mechanical properties of directly compressible pregelatinized sago starches. *Powder Technology,* 269, 15-21.

Wongsiriamnuay, T., & Tippayawong, N. (2015). Effect of densification parameters on the properties of maize residue pellets. *Biosystems Engineering,* 139, 111-120.

Workneh, T. S., & Oke, M. O. (2013). Thin layer modelling of microwave-convective drying of tomato slices. *International journal of food engineering,* 9(1), 75-90.

Yusof, Y., Mohd Salleh, F., Chin, N., & Talib, R. (2012). The drying and tabletting of pitaya powder. *Journal of Food Process Engineering,* 35(5), 763-771.

Zarein, M., Samadi, S. H., & Ghobadian, B. (2015). Investigation of microwave dryer effect on energy efficiency during drying of apple slices. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences,* 14(1), 41-47.

Zea, L. P., Yusof, Y. A., Aziz, M. G., Ling, C. N., & Amin, N. A. M. (2013). Compressibility and dissolution characteristics of mixed fruit tablets made from guava and pitaya fruit powders. *Powder technology*, 247, 112-119.

Zhang, Z., Song, H., Peng, Z., Luo, Q., Ming, J., & Zhao, G. (2012). Characterization of stipe and cap powders of mushroom (*Lentinus edodes*) prepared by different grinding methods. *Journal of Food Engineering,* 109(3), 406-413.

Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 16, No. 1, Apr. May. 2020, p.29-42

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد 16، شماره 1، فروردین-اردیبهشت 1399 ص. 42-29

Optimization of tomato compressed tablet production based on physical, mechanical and thermal properties in a hot air condition with microwave pretreatment

M. Rashidi [1], R. Amiri Chayjan[2*], A. Ghasemi[3]

Received: 2019.01.28
Accepted: 2019.06.11

Introduction: Tomato is one of the most valuable sources of minerals and vitamins supply in the human diet. Low shelf life of tomato and its short shelf life with inadequate processing facilities lead to heavy financial losses. Therefore, preserving and processing of tomato are of the commercial importance. Drying is one of the preferred methods for tomato preservation. Dried tomato products including half tomatoes, tomato slices and tomato powder, have many consumptions, compared with other tomato products. Among dried tomato products, tomato powder has a particular market. Powder production is an alternative method to extend the shelf life of foods. Usually the fruit powder is very dry, humidity absorber and has too much volume. Therefore, during storage, transportation and administration, it requires special care and heavy packaging which increase the cost. To overcome these problems, compression of the fruit powder in tablet form could be a proper solution. Tablet making of fruit powder has gained much popularity due to its ease of use, storage, transportation and product formulation. After the tablet making process, the pills contain high moisture contentwhich makes them un-suitable for transportation and storage. So, in order to prevent the tablets corruption and maintain their quality, tablet drying is one of the important steps after the tablet making process. The drying process is an important operation that affects the quality and final price of the product. Different drying methods play an important role in protecting foodstuffs. However, the effect of different drying methods on the quality of some foodstuffs is not clear.

Materials and methods: In this research, after the preparation of fresh tomatoes, the primary moisture content of tomatoes was determined using hot air oven method. Then, using blanching method, the tomatoes were peeled and samples were cut using a sharp razor in thicknesses of 3 mm. Tomato slices were dried using a semi-industrial dryer in a hot air at 50 °C at an air speed of 1 m/s. Dried tomato slices were powdered using a grinder. In order to homogenize the particle size, the tomato powder was sieved by a 50 mesh (Cavity size 0.5 mm) sample. Suitable moisture content to create sufficient adhesion between the particles of tomato powder was selected at %23 d.b. Water and fructose were used as a bonding agent. The process of producing tomato spherical tablets was performed by a hydraulic press. Drying tests of wet compressed tablets were performed immediately after the end of the tabletting process using a hot air drying machine with microwave pre-treatment. In this study, the effect of drying variables,through using of microwave pre-treatment along with hot air, including air temperature in five levels (40, 50, 60, 70 and 80 °C), air velocity at five levels (0.5, 1, 1.5, 2, and 2.5 m/s) and the duration of microwave application at five levels (zero (without microwave), 4, 8, 12, and 16 s) on physical properties (shrinkage and unit density), mechanical (penetration resistance) and thermal (Effective moisture diffusivity and energy consuming drying) of compact pomegranate produced from tomato powder were studied. Statistical analysis of data and optimization of drying process were performed using response surface method and central composite design.

Results and discussion: Results showed that effect of air temperature and duration of microwave pretreatment on all variables of compressed tomato tablets were significant in hot air dryers with microwave pre-treatment. Increasing temperature and time of microwave pre-treatment increased the effective moisture diffusivity and shrinkage of the final product. The temperature of the air inlet to the dryer had a negative effect on the resistance to penetration, the unit density and the specific energy consumption of the drying process. Drying under lower temperature conditions and less time for microwave pre-treatment resulted in an increase in the desirability of the drying process.

Key words: Optimization, Microwave pretreatment, Tomato compressed tablet, Drying.

1 MSc Student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
2 Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
3 PhD Student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
*(Corresponding Author E-Mail Address: amirireza@basu.ac.ir)